

Розглянуто процес теплообміну між миючою рідиною і нафтозалишком при струминному очищенні резервуарів від відкладень нафтопродуктів. Мийка здійснюється нагрітим розчином технічних миючих засобів. Це дозволить виявити вплив чинників на техногенні ризики забруднення довкілля шкідливими речовинами, які утворюються внаслідок експлуатування та проведення ремонтних робіт резервуарів із нафтопродуктами, а також визначити параметри вибухопожежонебезпеки процесу

Ключові слова: процес теплообміну, нафтозалишок, резервуар з нафтопродуктами, вибухопожежонебезпека, екологічна небезпека, техногенні ризики

Рассмотрен процесс теплообмена между моющей жидкостью и нефтеостатком при струйной очистке резервуаров от отложений нефтепродуктов. Мойка осуществляется нагретым раствором технических моющих средств. Это позволит выявить влияние факторов на техногенные риски загрязнения окружающей среды вредными веществами, которые образуются в результате эксплуатации и проведения ремонтных работ резервуаров с нефтепродуктами, а также определять параметры взрывоопасности процесса

Ключевые слова: процесс теплообмена, нефтеостаток, резервуар с нефтепродуктами, взрывопожароопасность, экологическая опасность, техногенные риски

УДК 614.84

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.33811

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ СТРУМЕНЯ МИЮЧИХ РІДИН НА НЕФТЕОСТАТОК В РЕЗЕРВУАРАХ

В. О. Липовий

Викладач

Кафедра пожежної та техногенної
безпеки об'єктів та технологій
Національний університет
цивільного захисту України
вул. Чернишевська, 94,
м. Харків, Україна, 61023
E-mail: lipovoy_vladimir@mail.ru

1. Вступ

Як відомо, аварійні викиди та витіки шкідливих речовин внаслідок проведення регламентних та ремонтних робіт з очищення внутрішніх технологічних поверхонь резервуарів із нафтопродуктами можуть призвести до локального до катастрофічного рівня завдання шкоди довкіллю та життєдіяльності людей.

В процесі розвантаження резервуарів частина нафтопродуктів затримується на внутрішніх поверхнях, конструкціях, у вигляді суцільного (прилипло-го) шару. Крім цього певна частина їх залишається в трубах, арматурі і насосах вантажної і зачисної систем. На днище резервуара осідають домішки, парафіни, асфальто-смолисті включення, продукти корозії, що відшарувалися.

В результаті утворюється невідкачуємий залишок, кількість якого змінюється в широких межах і залежить від ряду факторів: фізико-хімічних властивостей нафтопродуктів, температурного режиму транспортування, технічного стану вантажної системи і т. п. цей залишок являє собою суміш нафтопродуктів і при очищенні резервуарів утворюється пожежовибухонебезпечна ситуація, що може призвести до пожежі, вибуху чи екологічного забруднення території.

Розв'язання актуальної науково-технічної задачі виявлення впливу чинників на техногенні ризики забруднення довкілля шкідливими речовинами, які утворюються внаслідок експлуатування та проведення ремонтних робіт резервуарів із нафтопродуктами,

є науковим підґрунтям поліпшення системи забезпечення екологічної безпеки та умов надійної безпеки життєдіяльності людини навколо таких об'єктів [1].

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

За даними [2] на днищах резервуарів протягом року утворюється шар відкладень:

- в світлих нафтопродуктах – 5–10 мм; в оліях – 20–50 мм;
- в мазутах і моторних паливах – 25–100 мм.

При виконанні процесу очищення відбувається підвищення температури нафтошламів за рахунок підведення тепла від миючої рідини. Це призводить до інтенсифікації випаровування з поверхні відкладень і збільшує концентрацію горючих парів у резервуарі та на прилеглий до нього території (рис. 1).

Теорія формування гідромоніторних струменів, їх динаміка при взаємодії з твердою поверхнею представлені в роботах Інституту гірничої справи ім. А. А. Скочинського та Московського гірничого інституту С. С. Шавловський, В. Ф. Хнікіна, Г. П. Ніконовим і ін. [3]. Ці дослідження відносяться до струменям промислових гідромоніторів, призначених для розробки вугілля і гірських порід, основні параметри яких (тиск води, діаметр сопла) істотно відрізняються від параметрів мийних машин резервуарів [4–13]. Значна кількість робіт з дослідження різних аспектів динаміки струменевих потоків рідини і газу, пов'язаних з процесами тепломасообміну, формуван-

ня повітряних потоків і струменевого розпилення води в системах колективної безпеки танкерів-газовозів належить В. А. Голикову [4, 8, 13].

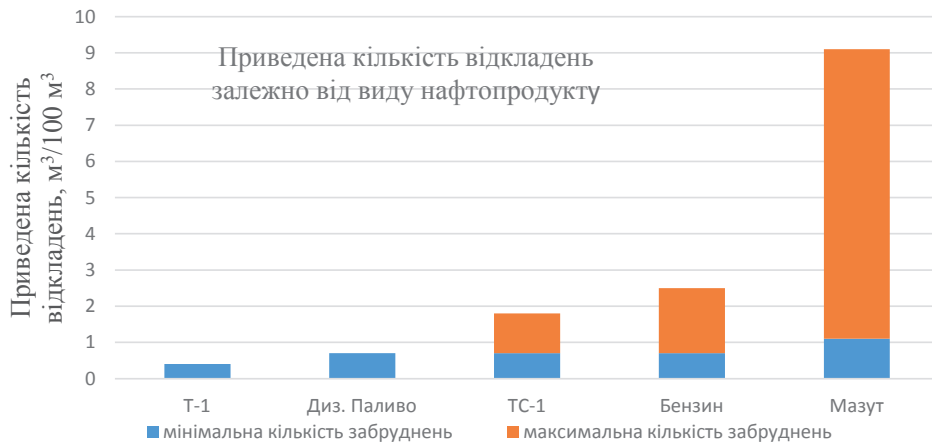


Рис. 1. Кількість залишкових забруднень, приведені до 100 м³ місткості резервуару

3. Мета та задачі дослідження

При мийці резервуара нафтозалишки чинять опір гідродинамічного впливу струменя води силами внутрішнього тертя, показником яких є в'язкість, і силами міжмолекулярної взаємодії, показником яких є поверхневий натяг. Ці показники визначають величини робіт деформації нафтозалишків і їх подальшого видалення з поверхонь резервуарів за рахунок енергії струменя. Оскільки обидва ці показники безпосередньо залежать від температури нафтозалишків, які нагріваються в результаті термічної дії миючої рідини, а в інформаційних джерелах відсутні будь-які відомості, що відносяться до дослідження теплообмінних процесів при митті вантажних відсіків, необхідно, ґрунтуючись на відомих законах теплопередачі, здійснити аналіз процесу теплообміну між миючою рідиною і шаром нафтозалишків на поверхні резервуара з нафтопродуктами.

Метою даної роботи є дослідження теплопередачі між струменем миючої рідини та нафтозалишками, при очищенні відкладень на внутрішніх поверхнях резервуарів з нафтопродуктами.

Необхідно визначити, як зміниться температура шару осаду при контакті з миючим розчином, за умови що температура рідини відрізняється від температури нафтозалишки. Тому, що при збільшенні температури поверхні нафтозалишки інтенсифікується випаровування нафтозалишків у об'єм резервуару та на зовні, що у свою чергу спричинить підвищення техногенного ризику.

4. Аналіз взаємодії струменя миючої рідини з відкладеннями на стінках резервуару

При ударі струменя миючої води по вертикальній стінці резервуара, нормально орієнтовану до осі струменя, миюча рідина розтікається по поверхні перешкоди симетрично щодо осі струменя [18]. Потім рідина стікає по стінці вниз у вигляді плівки шириною b_b і

товщиною δ_b . При стіканні рідини по шару нафтозалишків товщиною δ_n , що покриває внутрішні поверхні резервуару, відбувається передача теплоти від води через шар нафтозалишків, сталеву стінку резервуара товщиною $\delta_{ст}$ в зовнішнє середовище. Таким чином, теплота від миючої рідини передається в забортну повітря через багатошарову плоску стінку [18]. Безпосередня зміна температури нафтозалишків неможлива, так як їх шар розташовується між стінкою резервуара і плівкою стікаючої миючої рідини.

Для аналізу цього процесу теплопередачі приймаються деякі припущення. По-перше, процес розглядаємо як стаціонарний, при якому температура тіл постійна в часі. По-друге, нехтуємо втратами теплоти при тепловіддачі від води в газоподібне середовище всередині резервуара. Це допущення цілком виправдано, оскільки, як показує практика, різниця температур води t_b і атмосфери резервуара t_r становить 10...12 °С, що значно нижче різниці t_b і температури середовища t_{cp} (повітря), що контактує з зовнішньою поверхнею резервуара, тобто: $(t_b - t_r) \ll (t_b - t_{cp})$, тому в основному теплота буде передаватися від рідини в напрямку найбільшого температурного градієнта.

Процес теплопередачі аналізується з використанням графічного методу визначення температур на поверхні шарів неоднорідної стінки, в основу якого покладено властивість лінійної залежності температурного напору q в стінці від її термічного опору $1/k$:

$$t_b - t_{cp} = q \frac{1}{k} \text{ або для будь-якого шару } t_{ci} - t_{c(i-1)} = q \frac{\delta_{ci}}{\lambda_{ci}},$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, i , відповідно, δ_{ci} і λ_{ci} товщина і коефіцієнт теплопровідності i -того шару [18].

5. Результати дослідження процесу теплопередачі

Для аналізу цього процесу теплопередачі приймаються деякі припущення. По-перше, процес розглядаємо як стаціонарний, при якому температура тіл постійна в часі. По-друге, нехтуємо втратами теплоти при тепловіддачі від води в газоподібне середовище всередині резервуара. Це допущення цілком виправдано, оскільки, як показує практика, різниця температур води t_b і атмосфери резервуара t_r становить 10...12 °С, що значно нижче різниці t_b і температури середовища t_{cp} (повітря), що контактує з зовнішньою поверхнею резервуара, тобто: $(t_b - t_r) \ll (t_b - t_{cp})$, тому в основному теплота буде передаватися від рідини в напрямку найбільшого температурного градієнта.

Це дає можливість побудувати фіктивну стінку, в якій товщини шарів будуть пропорційні відповідним термічним опорам, а зовнішні термічні опори тепловід-

дачі рівні $1/\alpha_1$ і $1/\alpha_2$, де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від рідини до шару нафтозалишків, а α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки резервуара в контактуюче з нею середовище (повітря).

Загальний термічний опір теплопередачі через таку стінку:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}, \tag{1}$$

де $\delta_{ст}$, λ_n і $\lambda_{ст}$ – товщина стінки резервуара і коефіцієнти теплопровідності, відповідно, нафтозалишків і матеріалу стінки (довідкові дані).

Товщина шару нафтопродукту, налиплого на стінки резервуара, визначається зі співвідношення $\delta_n = K/\rho$ (м), де ρ (кг·м⁻³) – густина нафтопродукту, а K (кг·м²) – коефіцієнт налипання. Невідомими величинами у формулі (1) є коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2 .

6. Обговорення результатів дослідження

При плівковій течії води α_1 може бути визначений з критерію Нусельта для плівкової течії [19]: $Nu = 4\alpha\delta_b/\lambda_b$, де δ_b , і λ_b – відповідно, товщина плівки рідини і коефіцієнт теплопровідності рідини.

Для визначення α_1 необхідно знати величини Nu і δ_b . Для їх оцінки використані результати теоретичного дослідження взаємодії водяного струменя зі стінкою резервуара при його охолодженні в умовах пожежі, виконаного А. Є. Басмановим і А. А. Михайлюком [20], метою якого є оцінка швидкості стікання плівки води по стінці резервуара після удару струменя, товщини водяної плівки і меж області охолодження (ширина плівки води, що стікає). При цьому, оскільки діаметр резервуара значно більше ширини плівки води, автори дослідження знехтували урахуванням кривизни поверхні резервуара і вивчали процес стікання плівки води по плоскій вертикальній стінці.

У зазначеній роботі наводяться дані про товщину δ_b і ширину b_b водяної плівки при витраті води через пожежний ствол $V=0,0045$ м³·с⁻¹. Саме з цією величиною збігається середня витрата мийної води через одне сопло мийних машинок. Тому цілком обґрунтовано для подальших міркувань прийняті наведені в [20] значення показників стікання плівки води: $\delta_b=0,001$ м, $b_b=1,6$ м.

Величину критерію можна визначити за наведеною в [10] номограмі, знаючи значення критеріїв Рейнольдса Re і Прандтля P_r для плівкової течії: $Re = 4V/b_b v_b$, де v_b – кінематична вязкість води; $P_r = \vartheta_b \cdot C_{рв} \rho_b / \lambda_b$, де $C_{рв}$, ρ_b і λ_b – відповідно, питома ізобарна теплоємність, щільність і теплопровідність рідини.

При прийнятій температурі мийної води $t_b=50$ °С (мінімальна, рекомендована

РТМ 31.2006-78 [21], температура води), $Re=17629,0$, $P_r=4,25$, визначений за номограмою критерій $Nu=86,0$, $\lambda_1=13975,0$ Вт·м⁻²·К⁻¹.

У спеціальній літературі відсутні будь-які відомості про значення коефіцієнта тепловіддачі від плоскої стінки у повітря. При цьому виявлені нормативно регламентовані дані про коефіцієнти теплопередачі від нафтовантажів через сталеву стінку резервуару в повітря при температурі $t_{cp}=-25$ °С (k_1) і забортну воду при температурі $t_{cp}=0$ °С (k_2) [22]. З урахуванням цього формула (1) приймає вигляд:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{k_{1,2}}. \tag{2}$$

За наведеними в [22] графічним залежностям визначені $k_1=4,28$ Вт·м⁻²·К⁻¹ і $k_2=18,75$ Вт·м⁻²·К⁻¹. Результати аналізу процесу теплопередачі від стікаючої плівки мийної води через багатшарову плоску стінку в графічній інтерпретації представлені на рис. 2, де по осі абсцис в прийнятому масштабі відкладені величини термічних опорів, $1/\alpha_1$, δ_n/λ_n і $1/k_{1,2}$, а по осі ординат – температура мийної води $t_b=50$ °С і відповідні температури середовища: повітря – $t_{cp}=-25$ °С [18].

Товщина шару нафтопродукту, налиплого на вертикальні стінки резервуару, визначена за табличними даними, $\delta_n=(0,007...0,066) \cdot 10^{-3}$ м, для днищевої поверхні резервуару $\delta_n=(0,040...0,450) \cdot 10^{-3}$ м.

Для підвищення наочності графічного відображення процесу теплопередачі приймаємо товщину шару нафтозалишків $\delta_n=0,001$ м, що на два-три порядки вище наведених значень δ_n .

Термічні опори, що входять до складу виразу (2), мають таке значення: $1/\alpha_1=0,072 \cdot 10^{-3}$ м²·К·Вт⁻¹; $\delta_n/\lambda_n=1,54 \cdot 10^{-3}$ м²·К·Вт⁻¹ ($\lambda_n=65,0 \cdot 10^{-2}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹); $1/k_1=230,0 \cdot 10^{-3}$ м²·К·Вт⁻¹; $1/k_2=53,0 \cdot 10^{-3}$ м²·К·Вт⁻¹.

Ці величини термічних опорів на рис. 2 представлені, відповідно, відрізками АВ, ВС, СЕ та СD. Зміна температури в багатшаровій стінці при теплопередачі в повітря навколишнього середовища зображено прямими, відповідно, MD (суцільна лінія) і MF (пунктирна лінія).

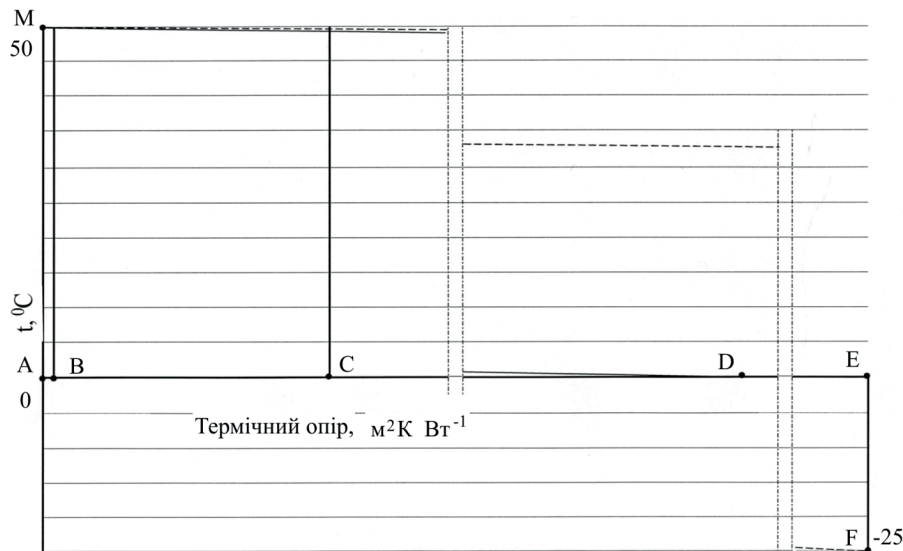


Рис. 2. Графічне відображення процесу теплообміну між мийною рідиною і шаром нафтозалишків на поверхні резервуара

Як видно з рис. 2, різниця температур шару нафтозалишків і миючої рідини не перевершує $1,5^{\circ}\text{C}$, навіть при збільшеній на кілька порядків товщині шару.

Для наведених вище значень товщин шару нафтозалишків, визначених за експериментальними даними, різниця температур буде ще менше.

7. Висновки

Отримані параметри, які впливають на вибухопожежонебезпеку процесу очищення резервуарів від залишків нафтопродуктів (температурний режим, час існування небезпечних концентрацій парів нафтопро-

дуктів, концентрації парів нафтопродукту всередині резервуара при очищенні), дозволяють прогнозувати ступінь небезпеки проведення робіт і розробляти ефективні заходи для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій при цьому та зниженню техногенних ризиків.

При збільшенні температури рідини, що використовується для гідравлічного очищення внутрішніх поверхонь резервуарів з-під нафтопродуктів – температура відкладень збільшується, але не суттєво. Так при температурі розчину 50°C , а температурі ззовні резервуару -25°C – температура поверхні нафтозалишку збільшиться на $1,5^{\circ}\text{C}$.

Література

1. Акимов, В. А. Надежность технических систем и техногенный риск [Текст] / В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалее. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
2. Кацман, Ф. М. Защита от коррозии нефтяных резервуаров-актуальная задача современности [Текст] / Ф. М. Кацман // Журнал Нефтегаз. – 2003. – № 11. – С. 17–19.
3. Шавловский, С. С. Основы динамики струи при разрушении горного массива [Текст] / С. С. Шавловский. – М.: Наука, 1979. – 174 с.
4. Голиков, В. А. Технология научного исследования по совершенствованию предремонтной подготовки танков нефтеналивных судов [Текст] / В. А. Голиков, В. В. Анфиногентов // Проблемы сбалансированности мирового рынка морской торговли. – 2011. – С. 47–52.
5. Анфиногентов, В. В. Определение количества технологического остатка мазутов после выгрузки танкера [Текст] / В. В. Анфиногентов // Судовождение: Сб. науч. тр. – 2010. – Вып. 19. – С. 8–13.
6. Удянский, Н. Н. Задача теплообмена при струйной очистке резервуаров от остатков нефтепродуктов [Текст] / Н. Н. Удянский, В. А. Липовой, А. Н. Ларин, С. А. Карденов // Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. – 2014. – № 1(13). – С. 52–55.
7. Гималетдинов, Г. М. Способы очистки и предотвращения накопления донных отложений в резервуарах [Текст] / Г. М. Гималетдинов, Д. М. Саттарова // Нефтегазовое дело: научно-техн. журнал. – 2006. – Вып. 1. – С. 40–52.
8. Голиков, В. А. Определение рационального режима процесса мойки грузового отсека танкера [Текст] / В. А. Голиков, В. В. Анфиногентов // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2011. – № 2. – С. 87–95.
9. Назаров, В. П. Проблемы и методы обеспечения зрывобезопасности предприятий нефтегазового комплекса [Текст] / В. П. Назаров // Вестник Академии Государственной противопожарной службы. – 2005. – № 4. – С. 209.
10. Назаров, В. П. Пожарная опасность гидравлической очистки резервуаров из-под нефтепродуктов [Текст] / В. П. Назаров, А. А. Киршев // интернет журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2012. – Вып. №3 (43). – С. 1–9. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-3/20-03-12.ttb.pdf>
11. Коршак, А. А. Выбор оптимальных режимов эксплуатации магистральных трубопроводов [Текст]: материалы VII междунар. науч.-техн. конф. / А. А. Коршак, В. И. Клишко; под общ. ред. В. К. Липского // Надежность и безопасность магистрального трубопроводно-го транспорта. – Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2011. – С. 77.
12. Тарновский, Д. М. Профилактика накопления пирофорных отложений в технологическом оборудовании с нефтепродуктами [Текст]: сб. материалов VI междунар. науч.-практ. конф. / Д. М. Тарновский // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы в 2 ч. Ч. 1. – Минск: КИИ, 2012. – С. 151–153.
13. Голиков, В. А. Линейная математическая модель динамики очистки воздуха от химических загрязнителей в центральном кондиционере [Текст] / В. А. Голиков, Н. А. Мамкичев, В. Г. Попов // Сб. науч. тр. УГМТУ им. адм. Макарова. – 2000. – № 2 (368). – С. 24–29.
14. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание [Текст] / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 413 с.
15. Макушок, Е. М. Механика трения [Текст] / Е. М. Макушок. – Минск: Наука и техника, 1974. – 256 с.
16. Фукс, Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов [Текст] / Г. И. Фукс. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 328 с.
17. Хныкин, В. Ф. Разрушение горных пород гидромониторными струями на открытых разработках [Текст] / В. Ф. Хныкин. – М.: Наука, 1969. – 150 с.
18. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.
19. Тананайко, Ю. М. Методы расчета и исследования пленочных процессов [Текст] / Ю. М. Тананайко, Е. Г. Воронцов. – К.: Техника, 1975. – 311 с.

20. Басманов, А. Е. Взаимодействие водяной струи со стенкой резервуара при его охлаждении в условиях пожара [Текст] / А. Е. Басманов, А. А. Михайлюк // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – Вып. 25. – С. 14–19.
21. Мойка грузовых танков и топливных цистерн танкеров. Типовая технология, технические требования: РТМ31.2006-78 [Текст] / Официальное издание, 1980. – 78 с.
22. Системы подогрева жидких грузов морских нефтеналивных судов. Правила и нормы проектирования: РД5.5524-82 [Текст] / Официальное издание, 1984. – 105 с.

Отримані залежності, які дозволяють встановити кількість теплової енергії, що виділяється та споживається в одиничному об'ємі спікаємої шихти по висоті шару від середнього діаметру часток матеріалу.

Наведені рівняння для обчислення кількості теплової енергії, що виділяється та споживається одиничним об'ємом при горінні часток палива й екзо- та ендотермічних реакцій, що протікають в ньому

Ключові слова: середній діаметр шихти, тепла енергія, барабанний живильник, агломерація, сегрегація, полідисперсна шихта

Получены зависимости, позволяющие определить количество выделяемой и поглощаемой тепловой энергии в единичном объеме спекаемой шихты по высоте слоя от среднего диаметра частиц материала.

Представлены уравнения, позволяющие вычислить количество тепловой энергии, выделяемой и поглощаемой в единичном объеме при горении частиц топлива и протекающих в нем экзо- и эндотермических реакций

Ключевые слова: средний диаметр шихты, тепловая энергия, барабанный питатель, агломерация, сегрегация, полидисперсная шихта

УДК 669.162.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29214

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В СЛОЕ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ

А. С. Мных

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра электротехники и энергетического менеджмента
Запорожская государственная инженерная академия
пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69007
E-mail: mnikh.a@yandex.ua

1. Введение

Основным способом окускования мелких железных руд и железорудных концентратов является агломерация методом просасывания. Благодаря сравнительной простоте технологии, высокой производительности ленточных агломерационных машин, сравнительно высокому качеству получаемого продукта этот способ нашел самое широкое распространение во всей мировой практике производства черных металлов из железных руд.

Агломерация является термическим процессом подготовки железорудного сырья к металлургическому переделу, в котором сочетаются потребление дорогостоящего твердого и газообразного топлива. Спекание материала сопровождается процессами нагрева и плавления шихты, горения топлива, разложения гидратов и карбонатов, окисления и восстановления окислов, которые протекают в небольшой по высоте части слоя – зоне горения, которая непрерывно перемещается в направлении колосниковой решетки.

Нагрев шихты в каждом элементарном слое происходит как за счет теплопередачи от вышележащих слоев, так и за счет тепла, выделяющегося при горении частиц твердого топлива и экзотермических реакций

в рассматриваемом единичном объеме слоя. Тепло, аккумулированное в этом объеме, расходуется на нагрев и оплавление частичек шихты, а также на протекание эндотермических реакций (разложение карбонатов и гидратов, восстановление окислов и др.).

Изучение составляющих теплового баланса в единичном объеме, позволит в зависимости от известного содержания топлива и химкомпонентов в рассматриваемом объеме, определить количество выделяемой и поглощаемой энергии по высоте слоя.

В настоящее время, учитывая постоянное подорожание энергетических ресурсов, проблема оптимизации агломерационного процесса, с целью сокращения объемов потребления твердого топлива и повышения производительности агломашин, становится крайне актуальной.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросу изучения теплового режима агломерации было посвящено ряд работ. При математическом описании теплофизической модели процесса в основу принимались уравнения теплового баланса (сохранения энергии) и различных видов теплопередачи [1, 2].